

Э.Е. ГЕРМАН, НТУ "ХПИ"

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Постановка проблемы. В основе систем нечеткого управления (СНУ) используется аппарат нечеткого логического управления (НЛУ), которое изначально разрабатывалось в качестве конструктивного решения безмодельного управления. Несмотря на большой успех применения НЛУ в прикладных задачах управления промышленными и производственными объектами, к сожалению, отсутствует систематический подход, как к проектированию нечеткого регулятора, так и к анализу его устойчивости. В последнее десятилетие системам управления (СУ) с нечеткой моделью было посвящено большое число работ в области НЛУ, которые гарантируют не только устойчивость, но также и высокие эксплуатационные показатели замкнутых СНУ. В данной работе представлен обзор и анализ последних разработок в области анализа и синтеза СУ с нечеткой моделью.

Анализ литературы. С момента введения теории нечетких множеств Заде [1] в 1965 году аппарат нечетких множеств и основанные на нем СНУ применяются в различных прикладных отраслях, таких как разработка систем управления, робастное моделирование, распознавание образов, обработка сигналов и информации, в области искусственного интеллекта и принятия решений, администрации, финансов, медицины, автомобильной промышленности, робототехники, и т.д. [2]. В частности, НЛУ, как одно из самых первых приложений нечетких множеств и систем, стало одним из наиболее успешно развиваемых направлений в этой области. Фактически, НЛУ доказало свое успешное применение в управлении многими сложными нелинейными и неаналитическими системами. Во многих случаях НЛУ было предложено как альтернативный вариант классическому управлению [3].

Первая система НЛУ была разработана Мамдани и Ассилиани [4], где рассматривалось управление миниатюрным паровым двигателем. Алгоритм управления состоял из наборов эвристических правил и нечетких множеств и операций нечеткой логики, использовавшихся, для представления лингвистических термов и оценки правил. С тех пор НЛУ привлекло к себе внимание представителей различных отраслей науки и техники, что подтверждается большим числом публикаций [5, 6, 2, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. НЛУ успешно применяются в различных прикладных областях, включая энергетические системы [13], инвестиции [14], телекоммуникации [15], химикотехнологические процессы [16], медицина [17], бытовая электроника [18], защита информации [19].

Основываясь на различиях правил и методах их генерации, НЛУ может быть классифицированы по следующим категориям: 1) классическое НУ; 2) нечеткое ПИД управление; 3) нейро-нечеткое управление (ННУ); 4) адаптивное НУ; 5) НУ на основе модели Такадзи-Сугено (ТСНУ). Отметим также, что такое деление не является четким, и различные подходы могут быть комбинированы. Например, классическое НУ может быть адаптивным, нечеткое ПИД управление может настраиваться посредством нейро-нечетких систем, или, например, в природе во многих случаях ННУ является адаптивным.

Целью этой статьи является обзор и анализ современного состояния методов анализа и синтеза систем управления с нечеткой моделью, в частности модели ТСНУ, разработанные в течение последних нескольких лет.

Структура системы нечеткого управления. Базовая структура системы нечеткого управления (СНУ) состоит из 4 основных компонентов: база знаний (БЗ), блок фаззификации (БФ), или фаззификатор, и блок дефаззификации (БДФ), или дефаззификатор, а также логическая система принятия решений [6]. На рис. 1 показана блочная диаграмма СНУ.

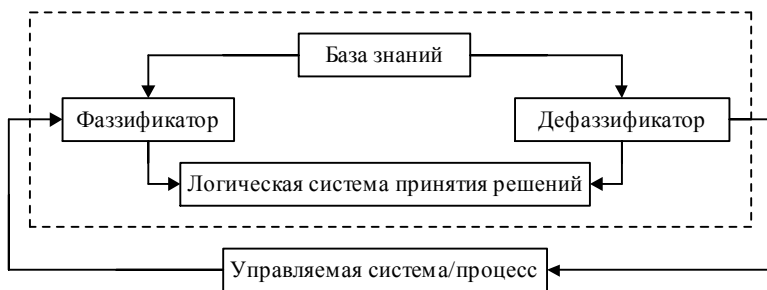


Рис. 1. Структура системы нечеткого управления

База знаний содержит все знания регулятора и включает базу правил (БП) нечеткого управления (НУ) и базу данных (БД). БД – “декларативная” часть БЗ, которая описывает определение объектов/целей (факты, условия, концепции) и определение функций принадлежности, использующихся в правилах НУ. БП НУ – “производственная” часть БЗ, которая содержит информацию относительно того, как эти объекты/цели могут использоваться для вывода новых управляющих воздействий. Логическая система принятия решений – это механизм рассуждений/умозаключений, который осуществляет процедуру вывода на правилах нечеткого управления и задает условия для вывода требуемых управляющих воздействий. Это центральная часть системы нечеткого управления. БФ определяет отображение действительного пространства в нечеткое, а БДФ определяет отображение нечеткого пространства, определенного в предметной области выхода к действительному про-

странству. То есть, БФ конвертирует четкое значение в нечеткое число, в то время как БДФ преобразовывает полученный нечеткий вывод в четкое значение.

1. Классическое НУ (НУ типа Мамдани). НУ Мамдани и Ассилани [4], которое по Сугено классифицируется как СНУ 1-го типа [8], использовалось для многих различных процессов управления. Например, в [20] Остерграад представил результаты экспериментальных данных алгоритма нечеткого управления для миниатюрного теплообменника. Также имеется множество других приложений классического НУ, включая робототехнику [21], очистку сточных вод [22], регулирование сетевого трафика [23] и т.д. Кроме того, в конце 80-ых начале 90-ых НУ широко применялось в различной бытовой электронной аппаратуре, например видеокамерах, стиральных машинах, телевизорах, и звуковых системах [18].

Эти методы классического НУ, по сути, являются эвристическими и свободно моделируемы. “*IF-THEN*” правила НУ получают, основываясь на знаниях или управляющем воздействии оператора. Очевидно, что метод проектирования работает хорошо только в том случае, когда оператор имеет большое значение в управлении системой.

Даже притом, что характеристики такой схемы управления в общем случае удовлетворительны, задача устойчивости замкнутой СНУ часто критикуется на ее ранних стадиях разработки, однако в [24] предложен анализ устойчивости НСУ с использованием эвристического подхода. В синтезе таких СУ отсутствуют систематические и непротиворечивые подходы к разработке. Таким образом, большие усилия были посвящены анализу устойчивости и проблемам синтеза регулятора классических НСУ. Ключевая идея этого подхода состоит в том, чтобы рассматривать нечёткий контроллер как нелинейный регулятор и вводить задачу устойчивости и вопросы разработки управления НЛК в классическую теорию устойчивости нелинейных систем. Однако обобщенная теория для анализа устойчивости и синтеза управления классических НЛК все еще не разработана.

2. Нечеткое ПИД управление. В промышленности классическое ПИД управление является наиболее применяемым методом управления для различных прикладных задач, благодаря их наглядной структуре, простоте проектирования и низкой себестоимости. Однако такое управление не дает удовлетворительные результаты в случае, если СУ имеет нелинейную или неопределенную структуру. С другой стороны, известно, что одним из основных свойств классического НЛУ является его способность качественно обрабатывать нелинейность и неопределенность исходных данных и возмущений, используя аппарат теории НМ. Таким образом, можно предположить, что путем объединения этих двух методов, можно синтезировать СУ, имеющую более высокие эксплуатационные показатели.

В литературе в подавляющем большинстве случаев под нечетким ПИД контроллером (НПИДК) понимают контроллер, по типу предложенного

Мамдани и Ассилиани [4] (рис. 2а). Это так называемый параметрический НПИДК [25, 261] в котором нечеткий вывод напрямую дает выходное управляющее воздействие на объект управления (ОУ). Другой тип – функциональный НПИДК – можно условно назвать ПИД контроллером с нечеткой настройкой коэффициентов (КННК) [27, 25] (рис. 2б), т.к. в данном случае происходит изменение ПИД коэффициентов контроллера, вследствие чего рабочее состояние и динамика системы изменяется.

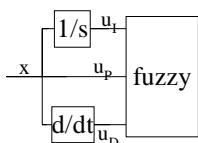


Рис. 2, а

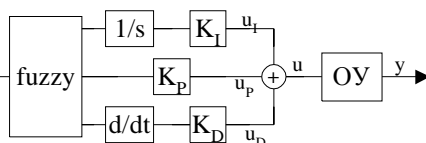


Рис. 2, б

В принципе, параметрические НПИДК способны делать тоже самое, что и КПИДК. Однако высокая стоимость установки нечеткой системы управления обычно препятствовала замене КПИДК на параметрический НПИДК. Как показано в [25], второй тип НПИДК – КННК – имеет тенденции к более широкому использованию в промышленности. Кроме того, показано, что многие НПИДК – это нелинейные ПИД контроллеры и в большинстве случаев выполняют свою задачу лучше, чем КПИДК.

Другие разделы, представляющие интерес в области нечеткого ПИД управления включают настройку нечетких параметров [28, 29, 30], оптимальный НПИДК на генетических алгоритмах [31], реализацию КПИДК методами нечеткого управления [32], улучшенный робастный НПИДК с оптимальным нечетким выводом [33], устойчивость НПИДК [34]. Отметим также, что самым большим ограничением нечеткого ПИД управления является трудность его систематического проектирования с непротиворечивыми и гарантируемыми рабочими характеристиками.

3. Нейро-нечеткое управление. Нейронное управление, или более правильно нейросетевое управление (НСУ), и НЛУ, являются двумя наиболее широко распространенными технологиями управления, основанными на искусственном интеллекте. Они во многом сходны: обе являются безмодельными технологиями управления, обе способны накапливать знания и использовать их для осуществления управляющих решений, обе до определенного уровня обеспечивают робастность СУ по колебаниям и внешним помехам. Однако эти две технологии отличаются способами получения знаний. Нейронное управление получает знания в основном посредством обучения. Это может являться как преимуществом (позволяет данным “говорить” за себя), так и в некоторых случаях недостатком (если набор данных тренировки не в полном объеме представляет область интересов). С другой стороны НЛУ, в

частности, классическое НЛУ, главным образом получает качественные и неясные знания от эксперта или оператора.

Так как две технологии управления дополняют друг друга: НСУ обеспечивает обучающие возможности и высокую вычислительную эффективность, а НЛУ дает мощную базу для представления знаний эксперта, – то возможность комбинации или интеграции этих двух технологий привлекает достаточно большое внимание. Классической комбинацией этих двух подходов является так называемое ННУ, в основе которого лежит НЛК, дополненный нейронными сетями для усиления таких его характеристик, как гибкость, способность к обработке данных и адаптивность [35, 36, 37]. Процесс нечеткого вывода реализуется с помощью нейронных сетей, чьи промежуточные весовые коэффициенты соответствуют параметрам нечеткого вывода [25]. Используя алгоритм обратного распространения ошибки, стимулируемое обучение, или любой другой алгоритм обучения нейронной сети, нейро-нечеткая СУ может определить правила НУ и обучить/настроить функции принадлежности нечеткого вывода, и тем самым реализовать ННУ. Объемный обзор приведен в [38], в котором обсуждаются вопросы генерации нейро-нечетких правил для большинства основных настроек программных вычислений. Другая область интересов, связанная с этим классом управления, задачу настройки параметров в нейро-нечетком контроллере (ННК) с помощью генетического алгоритма [37], ПИД контроллеры, настраиваемые с помощью нечеткой нейронной сети [39], адаптивное ННУ [36], и анализ устойчивости основанный на теореме малых коэффициентов [40].

Одним из основных преимуществ ННУ является то, что оно не нуждается в информации о математической модели регулируемой системы. Таким образом, этот класс нечеткого управления предлагает новый путь решения многих сложных проблем управления в реальной жизни, где математическую модель системы сложно или невозможно получить. Основным ограничением ННУ является систематический анализ устойчивости замкнутых систем управления и сходимости обучающих алгоритмов в контексте замкнутых систем управления.

4. Адаптивное нечеткое управление. Адаптивное управление (АДУ) относится к управлению системами с частично известной динамикой. Большинство работ по АДУ основаны на допущении, что нелинейные математические модели СУ сводятся к линейным или значительно упрощаются. АДУ линейными системами и некоторыми отдельными классами нелинейных систем были разработаны в период с конца 1970-х до 1990-х [3], в то время как систематический подход к АДУ нелинейными системами остается нерешенным. Тем не менее, на практике для многих сложных систем математические модели трудно применимы.

Используя ту же идею универсальной функции аппроксимации, что и в нейронных сетях, в [41] было показано, что нечеткая система способна аппроксимировать любые плавные (гладкие) нелинейные функции по выпуклой

области. Основываясь на свойстве аппроксимации нечетких систем в [42] был представлен адаптивный нечеткий контроллер для аффинных нелинейных систем с неизвестными функциями. Для представления этих неизвестных нелинейных функций используются нечеткие базисные функции, основанные на нечетких системах. Параметры нечетких систем, включающие функции принадлежности и описывающие лингвистические термы в нечетких правилах, усовершенствованы в соответствии с некоторыми адаптивными законами, полученными на основе теории устойчивости. После этого было опубликовано большое количество работ по адаптивному нечеткому управлению (АНУ), основная идея которых заключается в использовании нечетких систем для аппроксимации неизвестных нелинейных функций в нелинейных системах, а также в представлении нечетких систем в форме линейной регрессии по отношению к неизвестным параметрам с последующим применением эффективных методов АДУ. Однако следует отметить, что вследствие погрешностей аппроксимации между аппроксимирующими нечеткими системами и исходными нелинейными функциями для АНУ могут быть заимствованы некоторые методы робастного управления, и, если не применяются дополнительные методы управления, может быть достигнута только полуглобальная стабилизация.

Другие области применения АНУ включают улучшенные схемы АНУ с меньшим количеством параметров настройки или улучшенными характеристиками [43], жесткий адаптивный нечеткий контроллер с различными видами характеристик по отношению к внешним помехам [44], нечеткое адаптивное управление с эталонной моделью [45], использующее генетические алгоритмы для адаптивной настройки функций принадлежности [46]. В [47] рассмотрено совмещение адаптивных методик и методов управления в скользящем режиме. Сравнение АНУ и традиционного адаптивного управления представлено в [48].

5. НУ на основе модели Такаджи-Сугено. Нечеткая модель (НМ) Такаджи-Сугено (ТС) (НМТС), также называемая НМ Сугено 3-го типа [8], в сущности является нечеткой *динамической* моделью. В этой НМ множества нечетких правил используются для описания общей нелинейной системы по локальным линейным моделям, связанных гладкими нечеткими функциями принадлежности. Этот метод нечеткого моделирования предлагает альтернативный подход к описанию сложных нелинейных систем [49, 9], и существенно уменьшает количество правил при моделировании нелинейных систем высокого порядка [8]. Поэтому НМТС менее склонны к "проклятию размерности", чем другие нечеткие модели. Более того, НМТС обеспечивают основу для развития систематического подхода к анализу устойчивости и проектированию НЛК в рамках классической теории управления.

В течение последнего десятилетия для НМТС проведено большое количество теоретических исследований по вопросам функциональной аппроксимации, анализа устойчивости, синтеза контроллеров. Было показано, что

НМТС являются универсальными аппроксиматорами функции в том, что они способны аппроксимировать любую гладкую нелинейную функцию с любой степенью точности по любой выпуклой области [9]. Это обеспечивает теоретическую основу использования НМТС для приближенного представления сложных нелинейных систем.

Вывод. Проведенный анализ многочисленных работ оказывает, что классическое НЛУ все чаще используется в различных отраслях промышленности. Однако, оно ограничено как протоколами экспертов, так и невысокой устойчивостью системы. Следует отметить, что перспективными направлениями развития являются нечеткое ПИД управление, нейро-нечеткое управление, адаптивное нечеткое управление и управление на основе модели Такаджи-Сугено. Самым простым и наиболее распространенным в настоящее время является нечеткое ПИД управление.

Список литературы: 1. Zadeh L.A. "Fuzzy sets," Inform. Control, vol. 8, pp. 338–353, 1965. 2. Lee C.C. "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller – Part II," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 20, no. 2, pp. 419–435, Mar./Apr. 1990. 3. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учебник / Под ред. Егунова Н.Д. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002. – 744 с. 4. Mamdani E.H. and Assilian S. "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller," Int. J. Man Mach. Stud., vol. 7, pp. 1–13, 1975. 5. Babuska R. Fuzzy Modeling for Control. Boston, MA: Kluwer, 1998. 6. Lee C.C. "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller – Part I," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 20, no. 2, pp. 404–418, Mar./Apr. 1990. 7. Passino K. and Yurkovich S. Fuzzy Control. Reading, MA: AddisonWesley, 1998. 8. Sugeno M. "On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 7, no. 2, pp. 201–224, Apr. 1999. 9. Tanaka K. and Wang H.O. Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A LMI Approach. New York: Wiley, 2001. 10. Wang L.X. A Course in Fuzzy Systems and Control. London, U.K.: Prentice-Hall, 1997. 11. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с. 12. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. Под.ред. Ягера Р.Р. – М.: Радио и связь. 1986.-408с. 13. Flores A., Saez D., Araya J., Berenguel M. and Cipriano A. "Fuzzy predictive control of a solar power plant," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 13, no. 1, pp. 58–68, Feb. 2005. 14. Чернов В.Г. Модели поддержки принятия решений в инвестиционной деятельности на основе аппарата нечетких множеств. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. –312с. 15. Aoul Y.H., Nafaa A., Negru D. and Mehaoua A. "FAFC: Fast adaptive fuzzy AQM controller for TCP/IP networks," in Proc. IEEE Global Telecom. Conf., Dallas, TX, 2004, pp. 1319–1323. 16. Chen B. and Liu X. "Fuzzy approximate disturbance decoupling of MIMO nonlinear systems by backstepping and application to chemical processes," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 13, no. 6, pp. 832–847, Dec. 2005. 17. Teodorescu H.N., Jain L.C. and Kandel A. Fuzzy and Neuro-Fuzzy Systems in Medicine. Boca Raton, FL: CRC, 1998. 18. Kumar S. "A review of smart volume controllers for consumer electronics," IEEE Trans. Consumer Electron., vol. 51, no. 2, pp. 600–605, May 2005. 19. Корченко А.Г. Построение систем защиты информации на нечетких множествах. Теория и практические решения. - К.: "МК-Пресс", 2006. –320с. 20. Ostergaard J.J. "Fuzzy logic control of a heat exchanger process," in Fuzzy Automata and Decision Processes, M. M. Gupta, G. N. Saridis, and B. R. Gaines, Eds. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland, 1977, pp. 285–320. 21. Sun Y.L. and Er M.J. "Hybrid fuzzy control of robotics systems," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 12, no. 6, pp. 755–765, Dec. 2004. 22. Tong R.M. "A control engineering review of fuzzy systems," Automatica, vol. 13, pp. 559–568, 1977. 23. Kandel A., Manor O., Klein Y. and Fluss S. "ATM traffic management and congestion control using fuzzy logic," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C, Appl. Rev., vol. 29, no. 3, pp. 474–480, Aug. 1999. 24. Braae M. and Rutherford D.A. "Theoretical and linguistic aspects of the fuzzy logic controller," Automatica, vol. 15, pp. 553–577, 1979. 25. Гапон А.И., Герман Э.Е., Дербунович Л.В. Методы проектирования нечетких ПИД контроллеров. Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний

інститут”. № 36. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ“ХПІ”2005. -№17. – С. 15-21. **26.** Mann G.K.I., Hu B.G., and Gosine R.G. “Analysis of direct action fuzzy PID controller structures,” IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., B, Cybern., vol. 29, no. 3, pp. 371–388, Jun. 1999. **27.** He S.Z., Tan S., Xu F.L. and Wang P.Z. “Fuzzy self-tuning of PID controllers,” Fuzzy Sets Syst., vol. 56, pp. 37–46, 1993. **28.** Mudi R.K. and Pal N.R. “A robust self-tuning scheme for PI and PD type fuzzy controllers,” IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 7, no. 1, pp. 2–16, Feb. 1999. **29.** Гапон А.И., Герман Э.Е., Дербунович Л.В. Система нечеткого управления процессом выращивания функциональных монокристаллов. Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. № 36. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ“ХПІ”2006. -№31. – С. 11-18. **30.** Герман Э.Е., Дербунович Л.В., Белецкий С.В. Оптимизация параметров нечетких ПИД контроллеров. Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ“ХПІ”2007. - №36. – С. 3-8. **31.** Tang K.S., Man K.F., Chen G., and Kwong S. “An optimal fuzzy PID controller,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 48, no. 4, pp. 757–765, Aug. 2001. **32.** Mizumoto M. “Realization of PID controls by fuzzy control methods,” Fuzzy Sets Syst., vol. 70, pp. 171–182, 1995. **33.** Li H.X., Zhang L., Cai K.Y. and Chen G.R. “An improved robust fuzzy-PID controller with optimal fuzzy reasoning,” IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., B, Cybern., vol. 35, no. 6, pp. 1283–1294, Dec. 2005. **34.** Sio K.C. and Lee C.K. “Stability of fuzzy PID controllers,” IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., A, Syst. Humans, vol. 28, no. 4, pp. 490–495, Jul. 1998. **35.** Jang J.S.R. and Sun C.T. “Neuro-fuzzy modeling and control,” Proc. IEEE, vol. 83, no. 3, pp. 378–406, Mar. 1995. **36.** Li C.S. and Lee C.Y. “Self-organizing neuro-fuzzy system for control of unknown plants,” IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 11, no. 1, pp. 135–150, Feb. 2003. **37.** Wang W.Y., Cheng C.Y. and Leu Y.G. “An online GA-based output-feedback direct adaptive fuzzy-neural controller for uncertain nonlinear systems,” IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., B, Cybern., vol. 34, no. 1, pp. 334–345, Feb. 2004. **38.** Mitra S. and Hayashi Y. “Neuro-fuzzy rule generation: Survey in soft computing framework,” IEEE Trans. Neural Netw., vol. 11, no. 3, pp. 748–768, May 2000. **39.** Shen J.C. “Fuzzy neural networks for tuning PID controller for plants with underdamped responses,” IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 9, no. 2, pp. 334–342, Apr. 2001. **40.** French M. and Rogers E. “Input/output stability theory for direct neuro-fuzzy controllers,” IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 6, no. 3, pp. 331–345, Aug. 1998. **41.** Wang L.X. and Mendel J.M. “Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least squares learning,” IEEE Trans. Neural Netw., vol. 3, no. 5, pp. 807–814, Sep. 1992. **42.** Wang L.X. “Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems,” IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 1, no. 2, pp. 146–155, May 1993. **43.** Yang Y.S. and Zhou C.J. “Adaptive fuzzy H-infinity stabilization for strict-feedback canonical nonlinear systems via backstepping and small-gain approach,” IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 13, no. 1, pp. 104–114, Feb. 2005. **44.** Guan X.P. and Chen C.L. “Adaptive fuzzy control for chaotic systems with H-infinity tracking performance,” Fuzzy Sets Syst., vol. 139, no. 1, pp. 81–93, Oct. 2003. **45.** Yin T.K. and Lee C. S.G. “Fuzzy model-reference adaptive control,” IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 25, no. 12, pp. 1606–1615, Dec. 1995. **46.** Liu B.D., Chen C.Y. and Tsao J.Y. “Design of adaptive fuzzy logic controller based on linguistic-hedge concepts and genetic algorithms,” IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., B, Cybern., vol. 31, no. 1, pp. 32–53, Feb. 2001. **47.** Tong S.C. and Li H.X. “Fuzzy adaptive sliding-mode control for MIMO nonlinear systems,” IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 11, no. 3, pp. 354–360, Jun. 2003. **48.** Ordóñez R., Zumberge J., Spooner J.T. and Passino K.M. “Adaptive fuzzy control: Experiments and comparative analyses,” IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 5, no. 2, pp. 167–188, May 1997. **49.** Johansen T.A., Shorten R. and Murray-Smith R. “On the interpretation and identification of dynamic Takagi–Sugeno models,” IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 8, no. 3, pp. 297–313, Jun. 2000.

Поступила в редколлегию 17.12.08